

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响

杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品*

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 细菌抗药性问题已成为全球生态环境安全和人体健康领域的一个关注焦点。污水处理剩余污泥是抗生素抗性基因 (ARGs) 的一个重要储存库和排放源, 采用荧光定量 PCR 方法检测分析了四环素抗性基因 (TC-ARGs, 包括 *tetA*、*tetC*、*tetG*、*tetM*、*tetO*、*tetW* 和 *tetX*) 及第一类整合子 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中的变化特征, 考察了不同投加量零价铁 (Fe^0) 对目标基因的消长影响, 初步分析了质粒 DNA 接合作用对 TC-ARGs 水平转移的作用影响, 并探讨了 TC-ARGs 与 *intI1* 基因之间的相关关系。结果表明, 污泥厌氧消化过程对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度具有不同程度的削减作用, 其中 *tetX* 基因丰度降幅可达 2.4 个数量级。 Fe^0 的加入对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度削减不显著, 并且随着 Fe^0 投加量的增加, TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度相比对照组出现逐渐升高的趋势。通过对质粒组 DNA 所携带的 TC-ARGs 基因丰度进行检测分析发现, 质粒 DNA 接合作用对 TC-ARGs 的水平转移具有促进作用。相关性分析结果显示, *tetG* 与 *intI1* 基因之间具有显著正相关关系, 表明 *intI1* 基因在污泥厌氧消化过程中可能对 *tetG* 基因的演变过程具有重要影响。

关键词: 零价铁; 四环素抗性基因; 污泥厌氧消化; 基因水平转移; 第一类整合子

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1748-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708054

Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process

YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, LIU Zhen-hong, XUE Gang, GAO Pin*

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The problem of bacterial resistance has become an important issue in the area of global ecological safety and human health. Waste sludge is an important reservoir and discharge source for antibiotic resistance genes (ARGs). In this study, the quantities of seven tetracycline resistance genes (TC-ARGs), including *tetA*, *tetC*, *tetG*, *tetM*, *tetO*, *tetW*, and *tetX*, as well as those of class 1 integron (*intI1*) genes, during anaerobic sludge digestion process were comprehensively quantified by quantitative PCR (qPCR). The effects of different doses of zero valent iron (Fe^0) on the decrease and increase in the quantities of TC-ARGs and *intI1* genes were investigated. The influence of plasmid conjugation on the horizontal gene transfer (HGT) of the target TC-ARGs was preliminarily analyzed. The correlations between the quantities of TC-ARGs and *intI1* gene have been discussed. The results showed that the quantities of TC-ARGs and *intI1* genes decreased in different degrees during anaerobic sludge digestion, and the abundance of *tetX* gene was reduced by 2.4 orders of magnitude. When Fe^0 was added, no significant reduction in the quantities of TC-ARGs and *intI1* genes was observed. However, as the addition of Fe^0 increased, the quantities of TC-ARGs and *intI1* genes increased correspondingly, as compared to those in the control group. The results obtained from the quantities of TC-ARGs carried by plasmid DNA showed that plasmid conjugation probably promoted the HGT of TC-ARGs. A positive significant correlation was found between the quantities of *tetG* and *intI1* genes, indicating that *intI1* might play an important role in the evolution of *tetG* during sludge anaerobic digestion process.

Key words: zero valent iron; tetracycline resistance genes; anaerobic sludge digestion; horizontal gene transfer; class 1 integrons

我国是全球抗生素药物生产和使用大国^[1]。据统计^[2], 我国 2013 年抗生素使用量高达 16.2 万 t。由于抗生素的大规模使用甚至滥用, 造成大量残留物及其代谢产物进入生态环境^[3~6]。越来越多的研究报告^[7~9], 抗生素是造成细菌抗药性迅速演变和散播的主要原因, 而抗生素抗性基因 (ARGs) 作为一种新型污染物^[10,11], 已在不同环境介质中被频繁检出^[1,12~16]。污水处理剩余污泥是 ARGs 的一个重要储存库^[17], 近年来发现在污泥资源化土地利用过程中会造成 ARGs 的广泛散播^[18]。因此, 如何有

效地削减污泥中 ARGs 存在水平, 是控制其在污泥土地利用过程中散播的关键问题。

厌氧消化是目前国内外污泥安全处置的主流工艺^[19], 已有研究报道针对其过程参数对 ARGs 的去除变化影响进行了相关探讨^[20~22]。前期研究结果

收稿日期: 2017-08-07; 修订日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51208086); 上海市自然科学基金项目 (17ZR1400400); 中国博士后科学基金项目 (2017M611422)

作者简介: 杨帆 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及水质安全, E-mail: 944362424@qq.com

* 通信作者, E-mail: pingao@dhru.edu.cn

表明^[23], 在剩余污泥和餐厨废物组成的联合厌氧消化反应体系中, 零价铁(Fe^0)的加入不仅可以加快反应进程, 且能够促进四环素抗性基因(TC-ARGs)和第一类整合子 *intI1* 基因的削减. 尽管如此, 研究同时发现^[24], 核糖体保护基因 *tetM*、*tetO* 和 *tetW* 丰度在厌氧消化过程中出现反弹现象, 推测可能是由于基因水平转移过程的发生所造成的, 但具体原因还有待进一步研究.

目前, 质粒 DNA 接合作用、胞外 DNA 转换作用和噬菌体 DNA 转导作用是 ARGs 在细菌微生物之间水平转移的主要机制, 其中质粒 DNA 接合作用被认为对 ARGs 的散播起着最为关键的作用^[25]. 因此, 本研究考察了不同 Fe^0 投加量对污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度的消长影响, 分析了质粒 DNA 接合作用对 TC-ARGs 水平转移过程的作用影响, 并探讨了 *intI1* 基因与 TC-ARGs 之间的相关关系, 通过掌握 TC-ARGs 在污泥厌氧消化过程中的内在演变过程, 以期为其强化削减提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 实验药品

本研究所使用的实验药品均为分析纯, 除厌氧指示剂购自美国 Sigma-Aldrich 公司外, 其余购自国药集团化学试剂有限公司.

厌氧培养液组成如下 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KCl 1.3, KH_2PO_4 0.2, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.1, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.18, NaCl 1.17, NH_4Cl 0.5, NaHCO_3 2.5, 以及 1 mL 质量浓度为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的厌氧指示剂溶液和 1 mL 微量盐溶液.

厌氧指示剂溶液的配制: 称取 1 g 厌氧指示剂溶于 1 L 超纯水.

微量盐溶液组成如下 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.5, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.03, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.01, ZnCl_2 0.05, H_3BO_3 0.05, CuCl_2 0.5, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.05.

1.2 污泥厌氧消化体系的建立及运行

接种污泥取自上海松江污水处理厂二沉池剩余污泥, VSS 质量浓度约为 $8.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 污泥厌氧消化反应器采用容积为 250 mL 血清瓶, 接种污泥加入量为 100 mL, 同时加入 100 mL 厌氧培养液, 然后使用高纯氮气吹脱 5 min. 厌氧反应器共设两批平行装置, 每批共有 5 组, 分别标记为 AD-0、AD-1、AD-2、AD-3 和 AD-4, 每组设置 6 个

血清瓶, 其中 AD-0 为对照组, 其余 4 组投加 Fe^0 ($10 \sim 40 \mu\text{m}$), 加入量(以 Fe^0/VSS 计, 下同)分别为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (AD-1)、 $0.25 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (AD-2)、 $1.00 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (AD-3) 和 $3.75 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (AD-4). 将所有厌氧反应器置于恒温摇床内 (SPH-1102C, 上海世平实验设备有限公司), 避光, 控制摇速为 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 反应温度为 $55^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, pH 为 $7.2 \sim 7.8$ (S220, Mettler Toledo). 污泥厌氧消化反应周期为 35 d, 每隔 7 d 进行采样检测分析.

1.3 DNA 提取

基因组 DNA 提取: 按照预设采样时间, 采集一定量的泥水混合物在 4°C 和 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min, 倒去上清液, 收集沉淀物. 采用 TIANamp Soil DNA Kit (TIANGEN) 对基因组 DNA 进行提取, 提取步骤参照试剂盒操作说明书, 所提取的 DNA 使用 1% 琼脂糖凝胶电泳和 Qubit 2.0 核酸蛋白测定仪 (Invitrogen) 检测其纯度和浓度.

质粒组 DNA 提取: 采用 QIAprep Spin Miniprep Kit (Qiagen) 从基因组 DNA 中提取质粒组 DNA, 并使用 Plasmid-Safe™ ATP-Dependent DNase (Epicentre) 对其进行纯化, 以确保其纯度.

1.4 目标 ARGs 定量检测

采用 qPCR (LightCycler® 96, Roche) 对目标基因进行定量检测分析, 各目标基因所用扩增引物序列、扩增子大小、退火温度、反应体系及反应程序详见文献[23, 24]. 利用熔解曲线 ($65 \sim 95^\circ\text{C}$, 每 0.5°C 读数) 分析扩增产物的特异性, 从而优化 qPCR 反应条件和引物浓度, 消除引物二聚体和非特异性扩增的干扰影响. 每组样品设 3 个平行样, 并使用无菌水作为阴性对照.

1.5 数据分析

采用 Origin 8.5 软件进行数据处理, 并利用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析, 设定统计检验显著性水平 $P = 0.05$, 若 $P < 0.05$ 认为具有显著相关性, 反之则认为相关性不显著.

2 结果及讨论

2.1 污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的变化特征

图 1 为目标 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中的变化情况. 从中可以看出, 在整个反应周期 35 d 内, AD-0 反应器中所有 TC-ARGs 丰度均得到一定程度的削减, 其中 *tetX* 基因降幅最大, 达 2.4 个数量级, 而 *tetM* 基因降幅最小, 基本

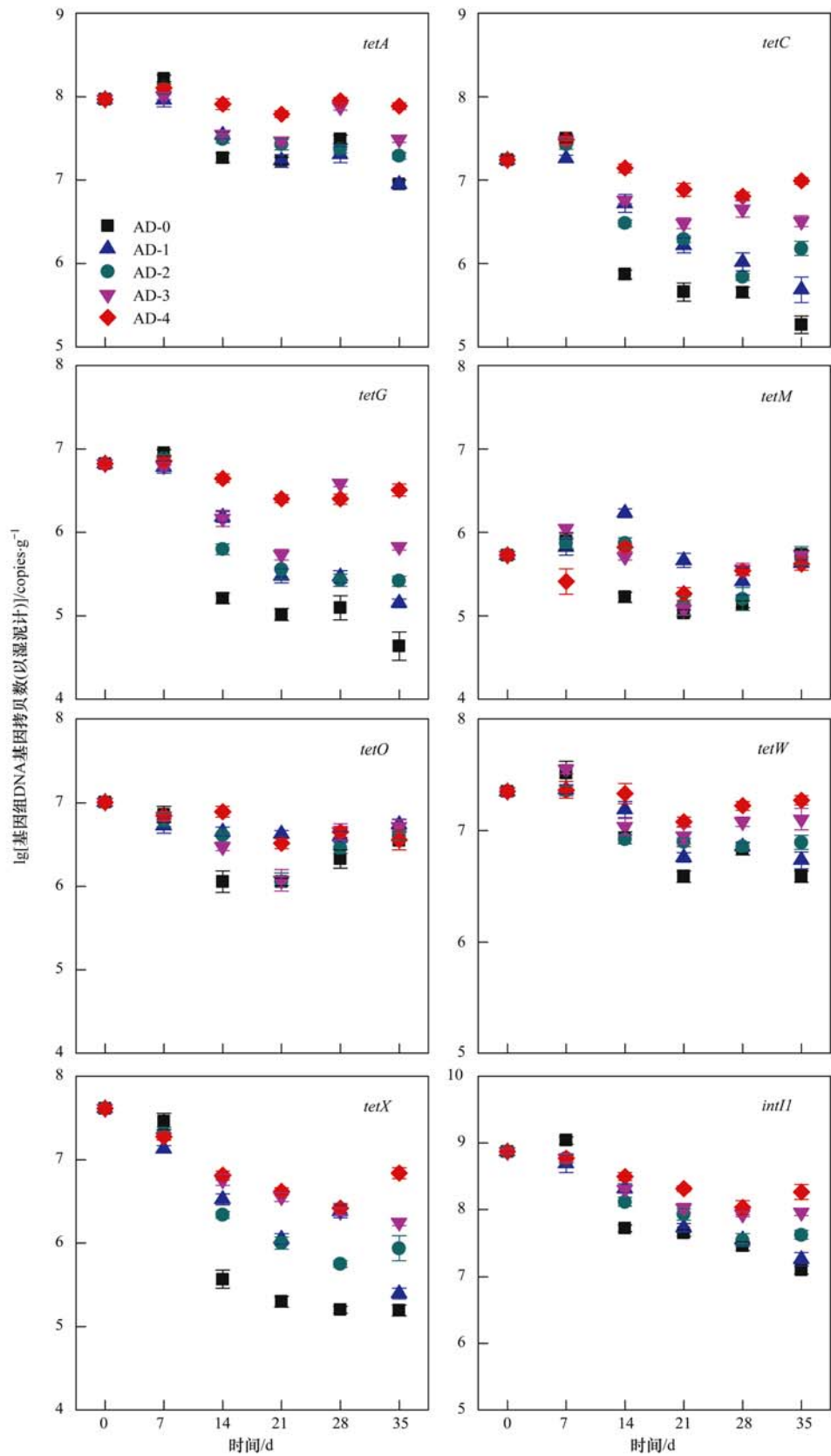


图 1 污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度变化特征

Fig. 1 Quantities of TC-ARGs and *intI1* genes during anaerobic sludge digestion process

无去除效果. 此外, 不同抗性机制的 TC-ARGs 在污泥厌氧消化过程中的变化特征各有差异, 其中外排泵基因(*tetA*、*tetC* 和 *tetG*)和酶修饰基因(*tetX*)降幅较大, 达 1.0~2.4 个数量级; 相比之下, 核糖体保护基因(*tetM*、*tetO* 和 *tetW*)削减效果较差, 最大降幅约为 0.8 个数量级(*tetW*), 这与前期研究结果相似^[23], 且 *tetM* 和 *tetO* 基因丰度在整个反应周期内呈现出先降低后升高的变化趋势, 表明污泥厌氧反应时间的延长不利于其有效削减. Ma 等^[26]的研究同样发现, *tetC*、*tetG* 和 *tetX* 基因丰度随着污泥停留时间的延长而显著降低, 而 *tetW* 基因丰度相比初始时更高. 与此同时, 除 *tetO* 和 *tetX* 基因外, 其余 TC-ARGs 丰度在厌氧消化反应初期(7 d)先升高(图 1), 而后呈现逐渐降低的趋势, 这可能是由于 TC-ARGs 发生水平转移, 或携带有 TC-ARGs 的细菌微生物在消化反应初期处于增长期所造成的^[27], 这在后续章节将进一步探讨. 随着厌氧反应过程的继续进行, TC-ARGs(除 *tetC* 和 *tetG* 外)到第 21 d 时已基本降至最低并维持稳定. 前期研究结果显示^[23], TC-ARGs 在污泥厌氧消化周期 8 d 内呈现逐渐降低的趋势, 这与本研究结果有所不同, 分析原因推测可能是因为厌氧反应底物的不同所导致的, 前期研究中采用的反应底物为餐厨垃圾和剩余污泥的混合体系, 餐厨垃圾一定程度上可以稀释剩余污泥中的有毒成分, 均衡厌氧微生物对营养物质的需求, 提高消化效率, 促进消化反应快速达到稳定^[28,29].

此外, 由于整合子基因能够捕获外源性基因, 通过转座子或接合性质粒进行 ARGs 的水平转移传播^[30], 因此本研究同样检测了 *intI1* 基因在污泥厌氧消化过程中的变化行为. 由图 1 可知, *intI1* 基因在接种污泥中的丰度高于 TC-ARGs, 达 7.43×10^8 copies·g⁻¹, 与大部分 TC-ARGs 变化特征类似, *intI1* 基因丰度在反应初期先升高, 而后逐渐降低, 尽管在整个反应周期内降幅达 1.8 个数量级, 但其削减过程并不显著($P=0.15$), 表明 *intI1* 基因在污泥厌氧消化过程中相对稳定, 对 ARGs 水平转移的发生可能具有潜在的促进作用.

2.2 Fe⁰ 对污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的消长影响

Fe⁰ 是一种性能优异的还原物质, 近年来已被尝试用于强化污泥厌氧消化进程^[31], 并已证实它能够促进有机物水解、原位产氢和产甲烷等有益效果^[32]. 有研究报道^[33], Fe⁰ 暴露能够导致小鼠肠道

细菌微生物群落中 *tetM*、*tetO* 和 *tetQ* 基因丰度的变化. 前期研究结果表明^[23], 一定投加量的 Fe⁰ 能够增强 TC-ARGs 和 *intI1* 基因的削减效果. 然而, 本研究结果发现, 随着 Fe⁰ 投加量的增大, 尽管污泥厌氧消化过程产物 VFAs 产量相应升高(数据未列出), 但 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度降幅却相应减小, 尤其当 Fe⁰ 投加量为 3.75 g·g⁻¹ 时, TC-ARGs 中外排泵基因、核糖体保护基因和酶修饰基因丰度的降幅分别仅为 0.09~0.31、0.08~0.45 和 0.77 个数量级, *intI1* 基因降幅也仅为 0.60 个数量级(图 1). 此外, Fe⁰ 的加入除在厌氧消化反应初期(7 d)对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度具有小幅度削减效果外, 随着厌氧反应的持续进行, TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度整体上呈现增长的趋势, 推测可能是因为 Fe⁰ 在促进污泥厌氧反应进程的同时能够强化 TC-ARGs 的水平转移, 且总体上随着 Fe⁰ 加入量的增大而呈现加强的趋势. 与此同时, 厌氧消化接种底物类型和反应周期的差异同样会影响 TC-ARGs 丰度的变化行为, 这可能也是导致本研究与前期研究结果有所不同的重要因素.

2.3 Fe⁰ 对污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 水平转移机制过程作用影响

根据 2.2 节结果分析推测, Fe⁰ 能够促进污泥厌氧反应过程中 TC-ARGs 的水平转移, 因此本研究检测了质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中的变化情况, 如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度变化趋势与基因组 DNA 相类似. 在整个反应周期 35 d 内, AD-0 反应器中所有 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度均得到不同程度削减, 其中外排泵基因、核糖体保护基因和酶修饰基因丰度降幅分别为 1.3~2.9、0.7~1.2 和 2.6 个数量级, 而 *intI1* 基因降幅约为 1.9 个数量级, 表明污泥厌氧消化过程能够有效地削减质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度, 这可能与质粒组 DNA 本身质量浓度的显著削减有关(降幅达 82.5%). 此外, 不同 Fe⁰ 投加量对质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度的变化影响不尽相同. 随着 Fe⁰ 投加量的增大, TC-ARGs 中外排泵基因和酶修饰基因, 以及 *intI1* 基因丰度削减幅度基本呈现出逐渐降低的趋势, 特别是在 Fe⁰ 投加量为 3.75 g·g⁻¹ 时, 其降幅分别约为 0.02~0.6、0.8 和 0.8 个数量级. 相比之下, Fe⁰ 的加入对核糖体保护基因丰度的作用影响

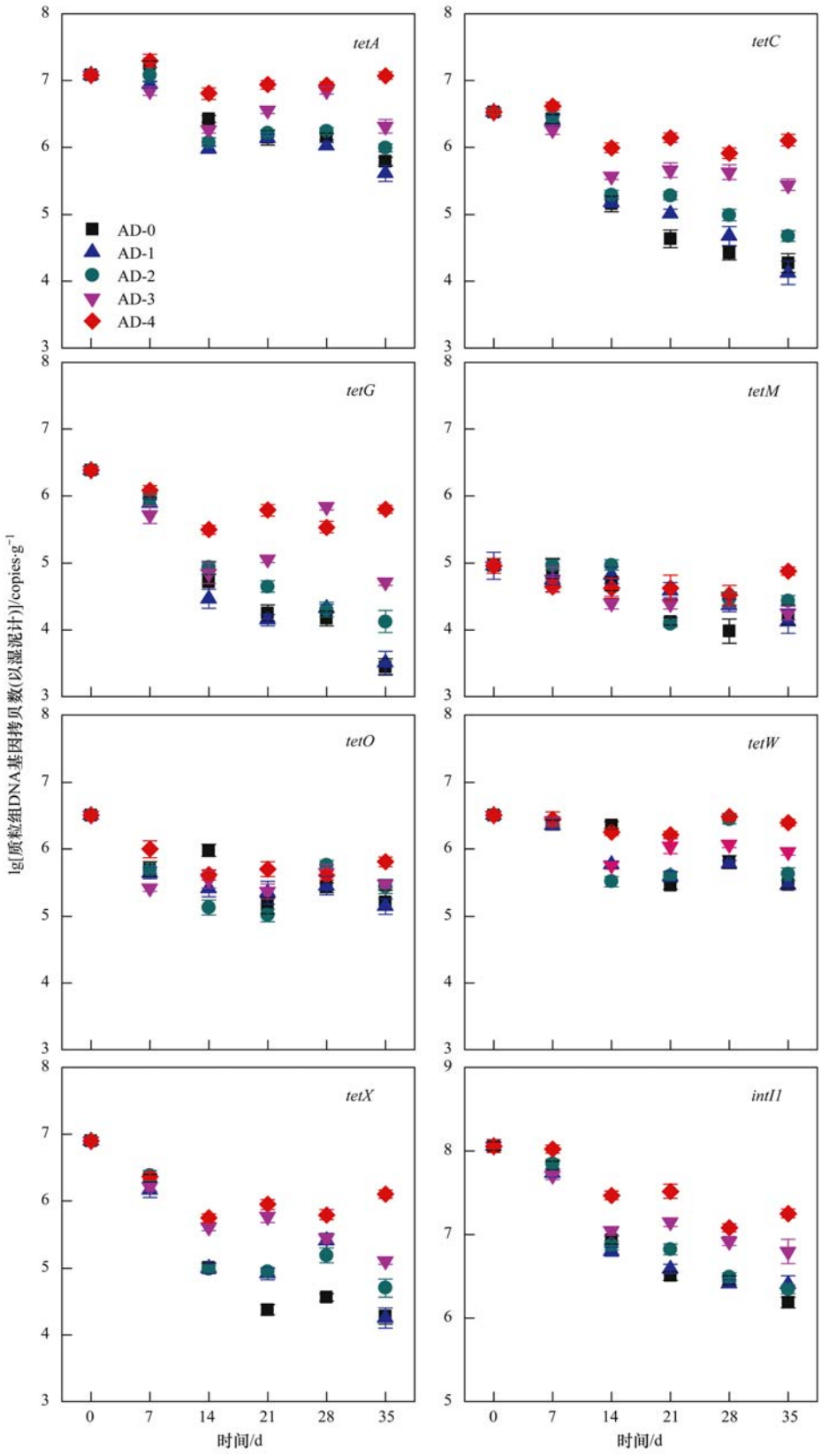


图 2 污泥厌氧消化过程质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度变化特征

Fig. 2 Quantities of TC-ARGs and *intI1* genes carried by plasmid DNA during anaerobic sludge digestion process

较小，表明其在污泥厌氧消化过程中存在较为稳定。

由上述分析可知， Fe^0 对污泥厌氧消化过程质粒组 DNA 中 TC-ARGs 的散播和转移具有促进作

用,分析原因推测可能是因为 Fe^0 在厌氧环境中会转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_2^{[32]}$,其良好的絮凝性能可以促使污泥絮体结合更加紧密,增强污泥微生物细胞之间的相互接触,从而强化 TC-ARGs 的水平转移.此外, Fe^0 的加入能够显著提高 VFAs 的产生量^[23,31],降低反应体系 pH 值,同样可能会促进污泥厌氧反应过程中 TC-ARGs 的水平转移^[20].

2.4 相关性分析

由于整合子基因能够促进外源性基因的获得和表达,并通过可移动遗传因子、质粒和转座子等在细菌群落之间进行传播^[29].从表 1 数据分析可知,在 AD-0 反应器中, *intI1* 基因与 TC-ARGs 之间均存

在显著正相关性($P < 0.05$),表明污泥厌氧消化过程中 *intI1* 基因与 TC-ARGs 的变化行为密切相关.此外, *intI1* 与 *tetG* 基因在所有反应器中均具有显著正相关性($P < 0.05$),表明 *intI1* 基因对 *tetG* 基因的演变特征具有重要影响,这与前期研究结果是一致的^[24].Zhang 等^[22]的研究同样发现,污泥与食品垃圾联合厌氧消化过程中 *intI1* 和 *tetG* 基因之间显著相关.相比之下,在 Fe^0 存在时, *intI1* 与 *tetM* 基因之间相关性较差,这可能是因为除质粒 DNA 转移作用外,胞外 DNA 转换作用和噬菌体 DNA 转导作用对污泥消化过程中 *tetM* 基因的水平转移具有重要影响,这有待后期进一步深入研究.

表 1 污泥厌氧消化过程中 TC-ARGs 与 *intI1* 基因相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis between quantities of TC-ARGs and <i>intI1</i> gene in anaerobic sludge digestion process											
目标基因		基因组 DNA					质粒组 DNA				
Fe^0 投加量/ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$		0	0.15	0.25	1.00	3.75	0	0.15	0.25	1.00	3.75
<i>tetA</i>	<i>r</i>	0.985	0.967	0.926	0.795	0.609	0.859	0.981	0.955	0.882	0.722
	<i>P</i>	0.000	0.002	0.008	0.059	0.200	0.028	0.001	0.003	0.020	0.105
<i>tetC</i>	<i>r</i>	0.995	0.960	0.909	0.863	0.768	0.983	0.967	0.980	0.995	0.959
	<i>P</i>	0.000	0.002	0.012	0.027	0.074	0.000	0.002	0.001	0.000	0.002
<i>tetG</i>	<i>r</i>	0.998	0.978	0.967	0.874	0.948	0.975	0.991	0.978	0.927	0.888
	<i>P</i>	0.000	0.001	0.002	0.023	0.004	0.000	0.000	0.001	0.008	0.018
<i>tetM</i>	<i>r</i>	0.814	0.095	0.474	0.610	0.239	0.909	0.802	0.672	0.979	0.454
	<i>P</i>	0.049	0.858	0.342	0.199	0.648	0.012	0.055	0.144	0.001	0.366
<i>tetO</i>	<i>r</i>	0.887	0.827	0.900	0.841	0.842	0.864	0.924	0.861	0.906	0.791
	<i>P</i>	0.018	0.042	0.014	0.036	0.035	0.026	0.008	0.028	0.013	0.061
<i>tetW</i>	<i>r</i>	0.959	0.929	0.982	0.811	0.721	0.850	0.985	0.725	0.942	0.521
	<i>P</i>	0.003	0.007	0.000	0.050	0.106	0.032	0.000	0.103	0.005	0.289
<i>tetX</i>	<i>r</i>	0.901	0.936	0.969	0.951	0.938	0.957	0.959	0.959	0.974	0.801
	<i>P</i>	0.014	0.006	0.001	0.004	0.006	0.003	0.003	0.002	0.001	0.056

1) 粗体字表示具有显著相关性($P < 0.05$)

3 结论

(1)目标 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度在污泥厌氧消化过程中均呈现出不同程度的降低趋势,但不同抗性机制的 TC-ARGs 变化特征有所差异,其中核糖体保护基因 *tetM*、*tetO* 和 *tetW* 的存在相对稳定.

(2) Fe^0 的加入虽然能够强化污泥厌氧消化反应进程,但对 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度削减影响不显著,且随着 Fe^0 投加量的增加,目标基因丰度反而出现升高的趋势.

(3) Fe^0 对污泥厌氧消化过程质粒组 DNA 中 TC-ARGs 和 *intI1* 基因丰度消长变化特征与基因组 DNA 相类似,表明 Fe^0 对质粒 DNA 接合转移 TC-ARGs 具有一定促进作用.

(4)由相关性分析结果可知,所有反应器中

tetG 和 *intI1* 基因之间均具有显著正相关关系,表明 *intI1* 基因在污泥厌氧消化过程中对 *tetG* 基因的演变行为具有重要影响.

参考文献:

[1] Zhu Y G, Johnson T A, Su J Q, *et al.* Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(9): 3435-3440.

[2] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, *et al.* Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(11): 6772-6782.

[3] Rizzo L, Manaia C, Merlin C, *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review [J]. Science of the Total Environment, 2013, **447**: 345-360.

[4] Du J, Zhao H X, Liu S S, *et al.* Antibiotics in the coastal water

- of the South Yellow Sea in China: occurrence, distribution and ecological risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 521-527.
- [5] Xu Y, Guo C S, Luo Y, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics, antibiotic resistance genes in the urban rivers in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 833-840.
- [6] 金磊, 姜蕾, 韩琪, 等. 华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2515-2521.
- Jin L, Jiang L, Han Q, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of thirteen sulfonamides antibiotics in a drinking water source in East China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2515-2521.
- [7] Gao P, Munir M, Xagorarakis I. Correlation of tetracycline and sulfonamide antibiotics with corresponding resistance genes and resistant bacteria in a conventional municipal wastewater treatment plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 173-183.
- [8] Zhang Q Q, Jia A, Wan Y, *et al.* Occurrences of three classes of antibiotics in a natural river basin: association with antibiotic-resistant *Escherichia coli* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14317-14325.
- [9] Zhang Y J, Boyd S A, Teppen B J, *et al.* Role of tetracycline speciation in the bioavailability to *Escherichia coli* for uptake and expression of antibiotic resistance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(9): 4893-4900.
- [10] Pruden A, Pei R t, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in Northern Colorado [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7445-7450.
- [11] 罗义, 周启星. 抗生素抗性基因 (ARGs)——一种新型环境污染[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1499-1505.
- Luo Y, Zhou Q X. Antibiotic resistance genes (ARGs) as emerging pollutants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(8): 1499-1505.
- [12] Su J Q, Wei B, Xu C Y, *et al.* Functional metagenomic characterization of antibiotic resistance genes in agricultural soils from China[J]. *Environment International*, 2014, **65**: 9-15.
- [13] Gao P, He S, Huang S L, *et al.* Impacts of coexisting antibiotics, antibacterial residues, and heavy metals on the occurrence of erythromycin resistance genes in urban wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(9): 3971-3980.
- [14] Bengtsson-Palme J, Larsson D G J. Antibiotic resistance genes in the environment: prioritizing risks [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2015, **13**(6): 396.
- [15] 李侃竹, 吴立乐, 黄圣琳, 等. 污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4589-4595.
- Li K Z, Wu L L, Huang S L, *et al.* Investigation of pollution characteristics of erythromycin resistance genes in a sewage treatment plant and the relevant selective factors [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4589-4595.
- [16] 张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 等. 北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4395-4401.
- Zhang L H, Wang J J, Ha X J, *et al.* Distribution characteristics of antibiotic resistance genes in vegetable soils in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4395-4401.
- [17] Calero-Cáceres W, Melgarejo A, Colomer-Lluch M, *et al.* Sludge as a potential important source of antibiotic resistance genes in both the bacterial and bacteriophage fractions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(13): 7602-7611.
- [18] Xie W Y, McGrath S P, Su J Q, *et al.* Long-term impact of field applications of sewage sludge on soil antibiotic resistance[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(23): 12602-12611.
- [19] Appels L, Baeyens J, Degève J, *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(6): 755-781.
- [20] Huang H N, Chen Y G, Zheng X, *et al.* Distribution of tetracycline resistance genes in anaerobic treatment of waste sludge: the role of pH in regulating tetracycline resistant bacteria and horizontal gene transfer[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 1284-1289.
- [21] Pei J, Yao H, Wang H, *et al.* Comparison of ozone and thermal hydrolysis combined with anaerobic digestion for municipal and pharmaceutical waste sludge with tetracycline resistance genes [J]. *Water Research*, 2016, **99**: 122-128.
- [22] Zhang J Y, Chen M X, Sui Q W, *et al.* Fate of antibiotic resistance genes and its drivers during anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **217**: 28-36.
- [23] 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 等. 零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 697-702.
- Wei X, Xue S L, Yang F, *et al.* Effect of zero valent iron on the decline of tetracycline resistance genes and class 1 integrons during thermophilic anaerobic digestion of sludge [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 697-702.
- [24] Gao P, Gu C C, Wei X, *et al.* The role of zero valent iron on the fate of tetracycline resistance genes and class 1 integrons during thermophilic anaerobic co-digestion of waste sludge and kitchen waste[J]. *Water Research*, 2017, **111**: 92-99.
- [25] von Wintersdorff C J, Penders J, van Niekerk J M, *et al.* Dissemination of antimicrobial resistance in microbial ecosystems through horizontal gene transfer[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 173.
- [26] Ma Y J, Wilson C A, Novak J T, *et al.* Effect of various sludge digestion conditions on sulfonamide, macrolide, and tetracycline resistance genes and class I integrons[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(18): 7855-7861.
- [27] Ghosh S, Ramsden S J, LaPara T M, *et al.* The role of anaerobic digestion in controlling the release of tetracycline resistance genes and class 1 integrons from municipal wastewater treatment plants [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **84**(4): 791-796.
- [28] 付胜涛, 于水利, 严晓菊, 等. 剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1459-1463.
- Fu S T, Yu S L, Yan X J, *et al.* Co-digestion of waste activated sludge and kitchen garbage[J]. *Environmental Science*, 2006,

- 27(7): 1459-1463.
- [29] 段妮娜, 董滨, 李江华, 等. 污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 321-327.
- Duan N N, Dong B, Li J H, *et al.* High-solids anaerobic co-digestion of sludge and kitchen garbage under mesophilic conditions[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 321-327.
- [30] Stalder T, Barraud O, Casellas M, *et al.* Integron involvement in environmental spread of antibiotic resistance[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, **3**: 119.
- [31] Feng Y H, Zhang Y B, Quan X, *et al.* Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron[J]. Water Research, 2014, **52**: 242-250.
- [32] 郝晓地, 魏静, 曹达敏. 废铁屑强化污泥厌氧消化产甲烷可行性分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2730-2740.
- Hao X D, Wei J, Cao D Q. Feasibility analysis of enhancing anaerobic digestion for methane production by waste iron scrap[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2730-2740.
- [33] Guo X C, Liu S, Wang Z, *et al.* Metagenomic profiles and antibiotic resistance genes in gut microbiota of mice exposed to arsenic and iron[J]. Chemosphere, 2014, **112**: 1-8.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017年10月31日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2016年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次10 024,影响因子1.878,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajihu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)